第46卷 第6期
2023年6月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

国家重点生态功能区人类活动与生境质量时空变化特征及空间效应

袁宏伟， 蔡 俊， 章 磊

（安徽农业大学经济管理学院，安徽 合肥 230000）

摘 要：基于1995—2020年多源空间数据，通过InVEST模型与人类足迹指数法，探究国家重点生态功能区生境质量与人类活动时空分布特征，进一步采用双变量局部自相关与空间杜宾模型测度两者空间依赖性与空间效应。结果表明：(1) 25 a间研究区生境质量逐年下降，总体上呈"西部由南向北递减、东部交错分布"的格局。(2) 25 a间人类活动强度与广度均不断加深，高低值分布以"胡焕庸线"为界。(3) 人类活动与生境质量有明显的空间依赖性，LISA聚类图表明高-高、高-低、低-高集聚类型下生态区数量分别为15、5、5，无低-低集聚区。(4) 不同自然-社会背景下，典型人类活动对生境质量影响的空间效应方向不同，但都有显著的空间溢出效应。具体表现为：高-高集聚区内人口与GDP分布总效应为正，贡献度以人口分布为主；高-低集聚区内人口与GDP分布仍以正向的空间溢出效应为主，但GDP贡献最高；低-高集聚区人口分布影响效应为负，GDP仍是以高贡献的正向空间溢出效应为主；无论何种集聚区，交通道路都是以负向的空间溢出效应为主。较科学地评估了国家重点生态功能区生态环境与人类活动的发展现状，丰富了研究的方法与思路；数理分析基础上的相关性探讨，为研究区生态文明建设提供了政策依据。

关 键 词：国家重点生态功能区；人类活动；生境质量；空间自相关；空间杜宾模型

文章编号：1000－6060(2023)06－0934－15(0934～0948)

相较于地质运动对自然环境的塑造，人类活动只是漫长岁月长河中的一瞬，但人类对自然的大规模影响正是发生在这一瞬[1]。从局地环境问题到全球生态危机，人地失衡似乎已到了临界点。20世纪50年代被认为是生态文明的起点，人类开始平等地对待同处地球生态系统中的大自然。吴传钧[2]提出了人地关系地域系统概念，开始从理论层面关注"地理环境和人类活动"的关系；Turner等[3]提出了人类与环境的耦合评估框架，推动了人与自然理论的发展。Lyons等[4]将生物多样性视为自然环境的特征变量，推动学界从基因、物种、生态系统等角度开展评估[5-7]，以表示人类活动对生物多样性的破坏，但缺乏具体的作用机制与定量分析。Mengist等[8]认为人类通过改变景观破碎度进而影响物种与生态系统间的能量转移；埃塞俄比亚的研究则表明土地利用方式的改变才是经济系统瓦解生态系统的关键[9]；刘彦随[10]也强调土地利用方式客观上反映了自然生态环境的累计压力。但上述研究着眼点都在土地景观的变化，而非人类活动本身。目前已有多种研究从生态角度出发定量化分析人类活动对生态环境的影响程度，如生态足迹指数[11]、NPP的人类占用[12]、人为干扰度[13]等，在量化人类生态资源占用量方面提供了可行的方法，但未考虑生态系统的异质性。Sanderson等[14]提出的人类足迹指数法，通过选择人类典型行为叠加影响力赋值，并根据不同生态系统进行归一化处理，为阿根廷[15]、哥伦比亚[16]、神农架[17]等地的生态规划提供了依据。目前关于人类活动与生境质量相关性的研究较少，且存在指标共线性、未考虑人类行为的多样性与复杂性，尤其是忽略了人类活动与生态环境的地理相

收稿日期：2022-05-20； **修订日期**：2022-08-04
基金项目：国家自然科学基金(71203054)；安徽省教育厅科学研究项目(SK2019A0133)资助
作者简介：袁宏伟(1997-)，男，硕士研究生，主要从事土地生态与可持续发展研究. E-mail: 1725649032@qq.com
通讯作者：蔡俊(1975-)，男，博士，副教授，主要从事土地生态与可持续发展研究. E-mail: 174323182@qq.com

关性等问题。此外，与过往不同，近期研究表明人类可能会因环境的社会和生态效益而对其加以保护[18-19]。国家重点生态功能保护区(简称生态区)作为人与自然和谐共生的示范区，在协调人地矛盾，推动生态文明建设领域发挥了重要作用[20]。近年来对生态区的研究主要集中在产业发展[21]、生态补偿机制[22]、生态环境评估[23]等方面，而生态环境评估也仅从生态本体出发，忽略了人类活动与生态环境的空间依赖性。本文在上述研究的基础上，以国家重点生态功能区生境质量与人类活动为导向，充分考虑物种与生态系统的共生性，以表征生态系统为物种生存提供适宜条件能力大小的生境质量作为研究对象，充分考虑人类活动外延的广度与深度，以学界公认的Moran's *I*指数[24-25]分析两者相关性，并创新地使用空间杜宾模型量化典型人类活动对生境质量的空间效应，以科学的数理分析为政策制定提供依据。主要探讨以下问题：(1) 生态区生境质量与人类活动时空变化如何？(2) 生态区人类活动对生境质量影响如何？(3) 典型人类活动对生境质量影响的程度与空间效应如何？

1　研究区概况

自2011年生态区设立以来，在保护区域环境、构建国家生态安全格局方面发挥了重要作用，“十四五”规划提出继续以生态区为重点，加快推进生态屏障建设。生态区以提供生态产品为主要功能，在水土保持、水源涵养、生物多样性维护、防风固沙等方面扮演了重要角色。但随着城市扩张与基础设施建设，人类以各种方式涉足生态区，在尊重生态脆弱性、保障生态适应性、不干预生态恢复性的生态理性下适度发展了旅游业、林果业，而在生态区外围采取工业生产、房地产建设等经济理性行为则严重干预了生态功能的发挥。为此，本文以除海洋生态区外的46个生态区为研究对象，对生态区生境质量与人类活动进行评估。为避免因边界外地理数据缺失导致出现异常值，本文以生态区涉及的982个县区为研究区，并在研究中向外设立15 km的缓冲区，具体位置如图1所示。

2　数据与方法

2.1　数据来源及处理

本文涉及的数据时间节点为1995、2000、2005、2010、2015年和2020年。土地利用数据、人口密度数据和GDP密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)(因缺乏2020年人口与GDP密度数据，以2019年数据替代)；道路交通数据来源于Open Street Map(http://www.openstreetmap.org/)；生态区边界数据由1:1000000全国

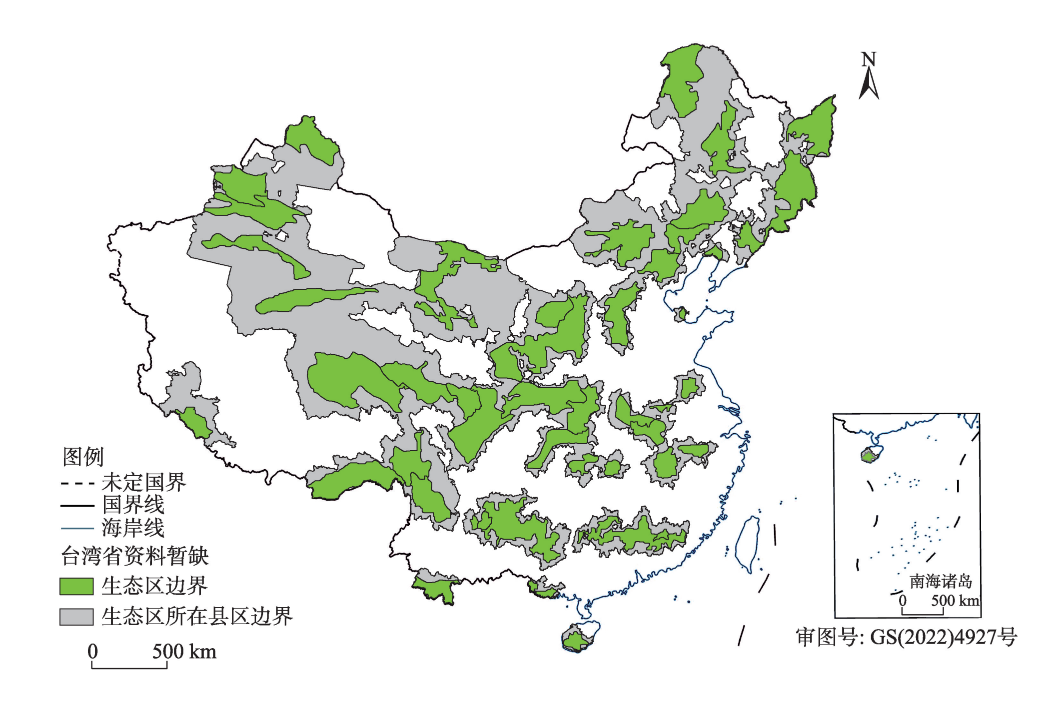


图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

基础地理数据库县域数据和生态区名录(2016年更新)生成。考虑到研究区范围及数据可获取性,对以上数据统一定义为Albers等积圆锥投影,统一空间分辨率为1 km,并对土地利用数据进行重分类。

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST模型 InVEST模型中的生境质量模块可以反映区域环境对物种生存的支持能力,生境质量指数越接近1,区域生境质量越好。公式如下:

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z+k^2}\right)\right] \tag{1}$$

式中:Q_{xj}为土地利用类型j中栅格单元x的生境质量;H_j为j的生境适宜性;Z为模型默认常数;k为半饱和常数,默认为0.5,需进行修正;D_{xj}为j中栅格单元x的生境质量胁迫水平,公式如下:

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\omega_r/\sum_{r=1}^{R}\omega_r\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{2}$$

式中:r为威胁因子;R为r的个数;y为r的栅格单元;Y_r为y的个数;ω_r为r的影响程度;β_x为栅格单元x的可达性水平;S_{jr}为土地利用类型j对r的敏感程度;i_{rxy}为y对栅格单元x的影响方式,公式如下:

$$i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right)\text{(线性衰减)} \tag{3}$$

$$i_{rxy}=\exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right)d_{xy}\right]\text{(指数衰减)} \tag{4}$$

式中:d_{xy}为栅格单元x与y之间的直线距离;$d_{r\max}$为r的最大威胁距离。

本文结合已有研究[26-28]及InVEST 3.2.0用户指南设计了威胁源影响程度表和生境源生境适宜性及其对威胁源的敏感性表(表1、表2)。

2.2.2 人类足迹指数(Human footprint index,HFI) 在前人的研究基础上[14,17,29],结合研究区自然社会特征与数据可得性,选取人口密度、GDP密度和交

表1 威胁源影响权重及距离

Tab. 1 Influence weight and distance of threat factors

威胁因子(r)	最大影响距离($d_{r\max}$)	影响程度(ω)	衰减函数(i)
水田	2	0.2	线性
旱地	2	0.2	线性
城镇用地	10	0.9	指数
农村居民点	6	0.6	指数
其他建设用地	8	0.7	指数

表2 各土地利用类型生境适宜度及威胁敏感度

Tab. 2 Habitat suitability and threat sensitivity of land use types

土地利用类型(j)	生境适宜度(H_j)	威胁因子敏感度(S_{jr})				
		水田	旱地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地
水田	0.4	0.0	0.1	0.4	0.3	0.5
旱地	0.3	0.1	0.0	0.4	0.3	0.5
有林地	1.0	0.4	0.4	0.7	0.5	0.6
灌木林地	0.9	0.5	0.5	0.8	0.6	0.7
疏林地	0.8	0.6	0.6	0.9	0.7	0.8
其他林地	0.7	0.6	0.6	0.9	0.7	0.8
高覆盖度草地	0.8	0.4	0.4	0.7	0.5	0.6
中覆盖度草地	0.7	0.5	0.5	0.8	0.6	0.7
低覆盖度草地	0.6	0.5	0.5	0.8	0.6	0.7
河渠	0.7	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3
湖泊	0.7	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
坑塘	0.6	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4
冰川永久性积雪	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
湿地	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4
城镇用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
农村居民点	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
其他建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
未利用地	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

通数据(铁路、高速、国道、省道、县道)共3类8种数据作为表征人类活动的指标，最终通过平权叠加得出人类足迹指数，取值范围为[0, 30]，数值越大表明人类活动强度越高。公式如下：

$$HFI_i = POP_i + GDP_i + ROAD_i \quad (5)$$

式中：HFI_i 为人类足迹指数；POP_i 为人口密度指数；GDP_i 为GDP密度指数；$ROAD_i$ 为交通通达度指数。计算原理如下：

(1) 人口密度是人类活动强度最直观的反映，对人口密度取对数值后并赋值在[0, 10]之间，有利于消除误差影响并对人口密度进行分级统计。

$$POP_i = 10/\log(POP_{d_{max}} + 1) \times \log(POP_d) + 1 \quad (6)$$

式中：POP_d 为人口密度栅格单元值；$POP_{d_{max}}$ 为人口密度栅格单元最大值。

(2) GDP密度指数采用分位数法进行分类赋值。分位数法相较于普遍应用的自然断点法在研究不同历史时期同一区域的连续数据时能够全面反映数据的极值特征和分布状况。对总体 X 和给定的α(0<α<1)，若存在 X_α，使 $P\{X > X_\alpha\} = \alpha$，则称 X_α 为 X 分布的上侧临界值。其中，X 为GDP密度分布区间，α为概率值。

(3) 本文选择对人类活动范围影响较大的道路分布数据作为交通通达度指标，建立15 km的缓冲区，缓冲区内按反距离法赋分。

$$ROAD_i = TL_s + GS_s + GD_s + SD_s + XD_s \quad (7)$$

式中：TL、GS、GD、SD、XD分别为铁路、高速、国道、省道、县道；s 为得分。

2.2.3 双变量局部Moran's I 局部空间自相关相较于全局空间自相关可通过LISA图对空间集聚特征做可视化分析。Anselin等[30]提出的双变量局部自相关可以衡量多个变量的空间依赖性。公式如下：

$$I_{kl}^i = z_k^i \sum_{j=1}^{n} w_{ij} z_l^j \quad (8)$$

式中：I 为莫兰指数，取值在[−1, 1]之间，若I<0且z≤1.96，则表示空间数据整体上呈负相关；若I>0且z≥1.96，则表示正相关；I 趋向于0，则表示不相关；w_{ij} 为空间权重矩阵；$z_k^i = \frac{x_k^i - \overline{x_k}}{k}$，$z_l^j = \frac{x_l^j - \overline{x_l}}{l}$，分别为属性$k$、$l$的方差；$x_k^i$、$x_l^j$ 分别为 i 单元属性 k 的值和 j 单元 l 属性值；$\overline{x_k}$、$\overline{x_l}$ 分别为 k、l 的平均值。

2.2.4 空间杜宾模型 在空间系统中，解释变量除直接影响本地区被解释变量外，还可通过空间溢出效应(间接效应)影响邻近地区被解释变量，继而通过反馈效应作用于本地区被解释变量。公式如下：

$$y = \lambda W_y + x\beta + W_x\delta + \varepsilon \quad (9)$$

式中：y 为生境质量；x 为解释变量；W 为变量的空间权重矩阵；δ 和 ε 为随机误差；β 为空间自回归系数，表示相邻地区生境质量对本地区生境质量的影响；λ 为空间误差项系数，表示相邻地区生境质量的扰动误差对本地区生境质量的溢出效应。

3 结果与分析

3.1 生境质量时空演变分析

结合研究区现状与前人[31-32]研究，以改良自然断点法划分生境质量等级，以标准差椭圆反映各生境质量集聚区分布方向，结果如图2、表3所示。

3.1.1 研究区生境质量时空格局分析 从空间上看，研究区生境质量整体上呈"西部由南向北递减、东部交错分布"的格局，这与我国自然与人文地理空间分异特征是一致的。1995—2020年生境质量空间变迁度较低。以2020年为例，高值区主要分布在东北部兴安岭地区、长白山地区和南部丘陵地区，占研究区总面积的38.5%。以上区域以山地地形为主，受东南季风影响，降水充沛，丰富的森林资源为高生境提供了绝佳的载体。中值区空间分离度较高，主要分布在中西部地区，华北地区东南部、华东地区西南部以及东北地区中部。以上区域以

表3 1995—2020年研究区及生态区生境质量总量变化

Tab. 3 Changes of total habitat quality in national key ecological function zones and the study area during 1995—2020

区域	生境质量	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
研究区	总量	324992.72	322401.26	322354.82	322316.92	321727.76	313556.66
	变化率	1.00	−0.01	0.00	0.00	0.00	−0.03
生态区	总量	154832.77	153495.00	153467.65	153463.25	153198.99	152796.14
	变化率	1.00	−0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

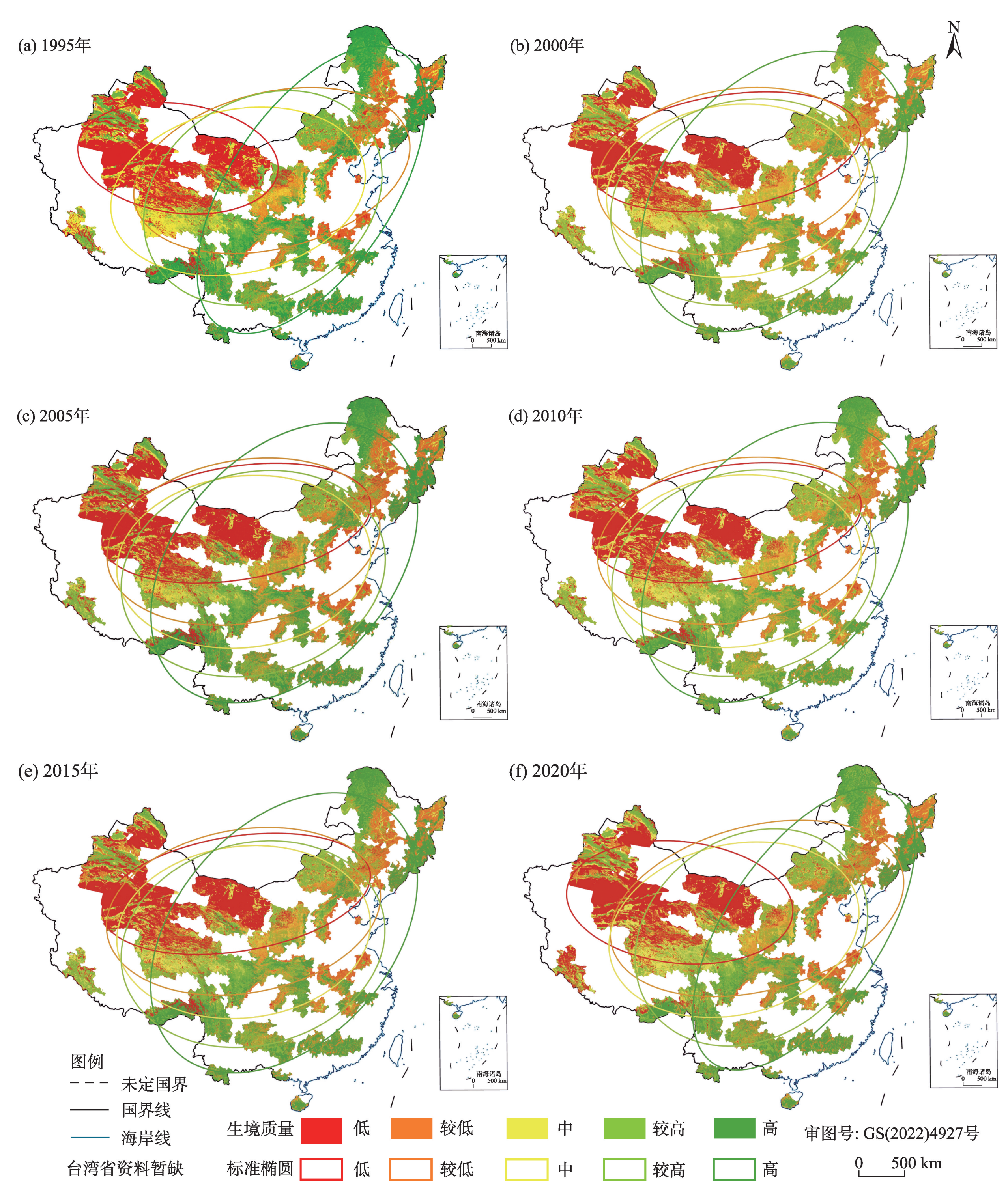


图2 1995—2020年研究区生境质量评级及方向分布

Fig. 2 Habitat quality rating and direction distribution map of the study area during 1995—2020

内陆平原地形为主,一方面大型森林、河流湖泊等高阶生态资源较少,另一方面城镇化水平较低,高生境威胁度的人类胁迫因子较少,在人类活动与生境资源的制衡下,生境质量以中值细碎化分布为主,面积占比为22.6%。低值区主要集中在西北干旱半干旱地区,环境脆弱且敏感,生态退化严重,面积占比为38.9%。

从时间上看,25 a间研究区生境质量总量呈缓慢下降趋势。其中1995—2000年降幅相对明显。与90年代粗放发展,加之改革开放后经济理性对生

态保护的忽视有关，这一时间段生境质量降幅在0.80%~0.86%之间。2000—2010年降幅较小，与往年基本持衡。《中国21世纪初可持续发展行动纲要》提出要加强生态保护，并通过建设“三北”及长江中下游防护林、建立自然保护区及生态保护区等措施，遏制了经济理性带来的生态退化，生境质量降幅仅在0~0.02%之间。2010—2015年降幅再次增大，约为0.17%，预计与2008年四万亿经济刺激计划提振经济，城镇化与基础建设快速发展挤压生态空间有关。2015—2020年研究区降幅达2.5%，为历年最高值，生态区内生境质量降幅较2005—2015年有所增加，预计与近年来主城区扩张、县域新城开发等建设用地扩张有关。表4椭圆参数变化表明：受经济理性思想影响，东南部生境质量略有下降，生境质量高值区向西北偏移，中、低值区则向东南移动，中部地区成为经济发展与生态保护的交错地带。高、低值区扁率的扩张与收缩也证明了生态区生境质量退化的事实。

3.1.2　生态区生境质量时空格局分析　为进一步分析各生态区生境质量变化特征，消除面积差异对生态区生境质量的影响，本文以地均生境质量的均值表征各生态区生境质量平均水平，结果如图3所示：高值生态区以水源涵养、物种资源生态功能为主，占生态区总面积的26.9%。除大兴安岭和长白山区外，其余生态区均分布在南方地区，如海南岛中部山区、南岭山地、滇西北生态区等，以上区域森林、河流等高阶生境资源丰富，且以山地地形为主，较强的地域封闭性与较低的人类干扰度共同支撑了生态环境的发展。较高值生态区以水源涵养和水土保持功能为主，占生态区总面积的18.7%。除雅鲁藏布江源头区、京津水源涵养区、太行山区外，其余生态区仍分布在南方地区。以上生态区受制于

表4　1995—2020年各生境质量评级标准差椭圆参数变化

Tab. 4　Variation of standard deviation ellipse parameters of habitat quality rating during 1995—2020

评级	质心移动/km	Δ长轴/km	Δ短轴/km	Δ扁率
低	147.84	−74.19	−149.51	−0.01
较低	59.45	−107.39	−50.67	−0.01
中	67.33	22.78	−38.05	0.04
较高	19.95	26.51	−10.29	0.02
高	30.67	25.20	48.93	−0.02

地形、坡度等自然因素，自身环境脆弱；加之距离城镇相对较近，人类活动辐射作用下，生境质量相对略低。中值生态区以水源涵养、防风固沙和洪水调蓄功能为主，占生态区总面积的40.9%。除洞庭湖区、鄱阳湖区和淮河源区位置相对偏南以外，其余生态区主要分布在东北及西北地区。较低值生态区以防风固沙、洪水调蓄和物种资源功能为主，占生态区总面积的13.5%。除西北地区的塔里木河流域、阿尔金荒漠与黑河流域所受人类干扰较少外，其余较低值生态区均分布在人类开发强度大的东部区域，如沿淮河生态区、黄河三角洲生态区、南水北调东段生态区等。无低值生态区。

3.2　人类活动时空演变特征分析

3.2.1　研究区人类活动时空格局分析　如图4所示，从空间上看，“胡焕庸线”两侧人类足迹指数（Human footprint index，HFI）数值差异明显。东侧为大量的HFI中高值分布区，西侧除北疆、甘肃HFI数值较高外，其余区域HFI以低值为主，东西部差距明显。我国人类活动空间分布有着复杂的历史经纬，自两晋时期人口南迁到如今的区域中心城市集聚，中国人口历经七次大规模迁移形成了如今东多西少的格局；受改革开放和人口红利的影响，GDP与基础设施建设也呈东西向递减的分布格局。受制于经济发展水平，我国在很长的一段时间内仍将保持东西部区域发展失衡的局面。

从时间上看，25 a间HFI数值增幅不断扩大。其中1995—2010年增速较缓且东西部差异相对较小；2010—2020年由于四万亿经济刺激计划以及承接发达国家产业转移，以东南沿海地区为首的东南部生产力快速发展，经济总量不断增加。在人口集聚和城市扩张的背景下，HFI增幅进一步扩大，东西部区域差异愈加明显。

表5标准差椭圆参数变化表明，25 a间HFI高值区质心点向西南移动185.94 km，分布方向与扁率变化不大。较高值区质心点向西偏北方向移动864.84 km，椭圆长短轴分别缩短239.28 km、535.24 km，在东西向上呈扩张态势。中值区移动方向与较高值区一致，但质心点移动距离较远，为1035.98 km，且有由东部斜向分布转为北部斜向分布的趋势，倾角更小、空间格局更为分散。较低值区向东偏北移动353.38 km，椭圆方向与扁率变化不大，表明较低值区分布相对稳定。低值区质心点向

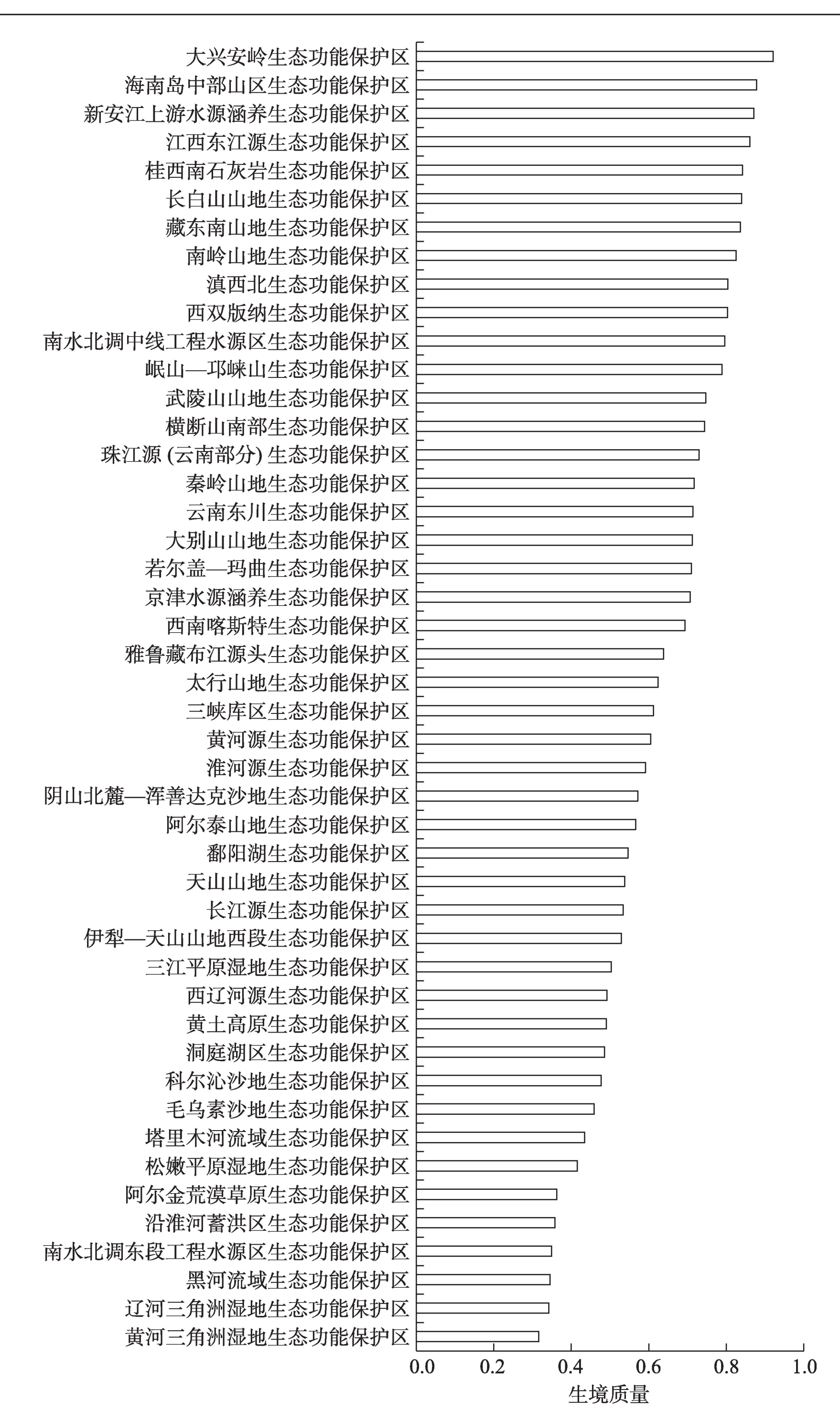


图3 25 a间生态区生境质量平均水平

Fig. 3 Average level of habitat quality in national key ecological function zones in 25 years

西南移动191.56 km，但1995—2000年方向变化剧烈，由东—西横向分布转变为东北—西南斜向分布，且扁率减小0.09，表明低值区在东西向有收缩集聚的态势。

3.2.2 生态区人类活动时空格局分析 如图5所示，HFI高值区以东部洪水调蓄功能区为主，占总面积的3.7%。黄河、长江、淮河下游丰富的水土资源及航运优势使之成为生态区内人类活动最剧烈的区域，而发达的经济必定会制约生态保护区的规模。较高值区以东南部水源涵养与水土保持功能区为主，占总面积的22.3%。以上区域背靠东南经济发达地区，依托良好的生态资源禀赋，旅游业、林果业

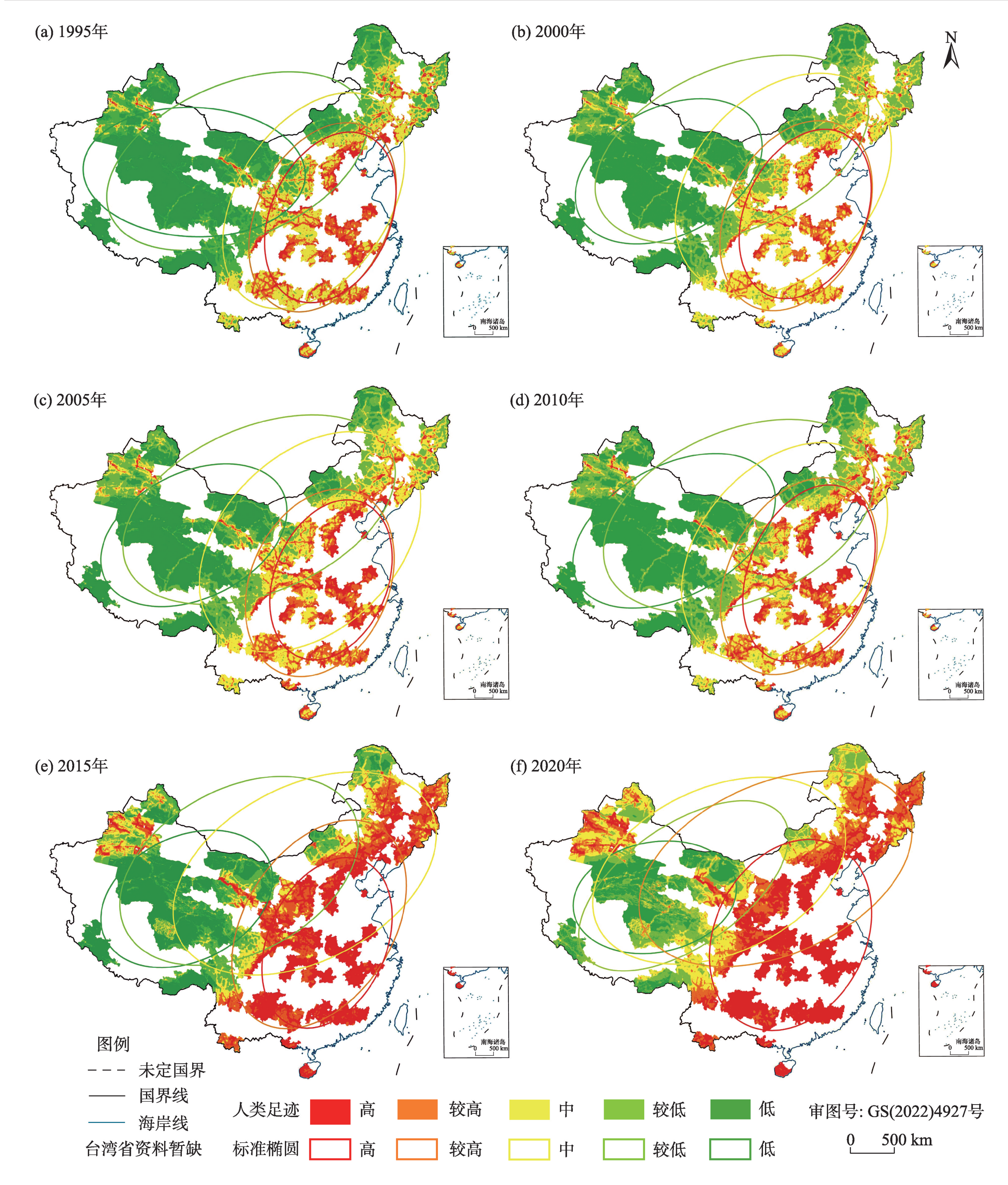


图4　1995—2020年研究区人类活动足迹评级及方向分布

Fig. 4　Human footprint rating and direction distribution map of the study area during 1995—2020

发展迅猛。中值区主要分布在东北地区和黄土高原地区，多以农业生产活动为主，占总面积的23.4%。低值与较低值区主要分布在西部及阴山北部地区，多为干旱半干旱地区，脆弱的生态环境迫使人类向外迁移，占总面积的50.6%。

3.3　人类活动与生境质量双变量局部自相关分析

为进一步探究生态区人类活动与生境质量相关性，本文采用在空间相关性研究上成果显著的Moran's I指数与LISA聚类图对相关性进行定量化、可视化的分析。结果如表6所示：在$P<0.001$的显著

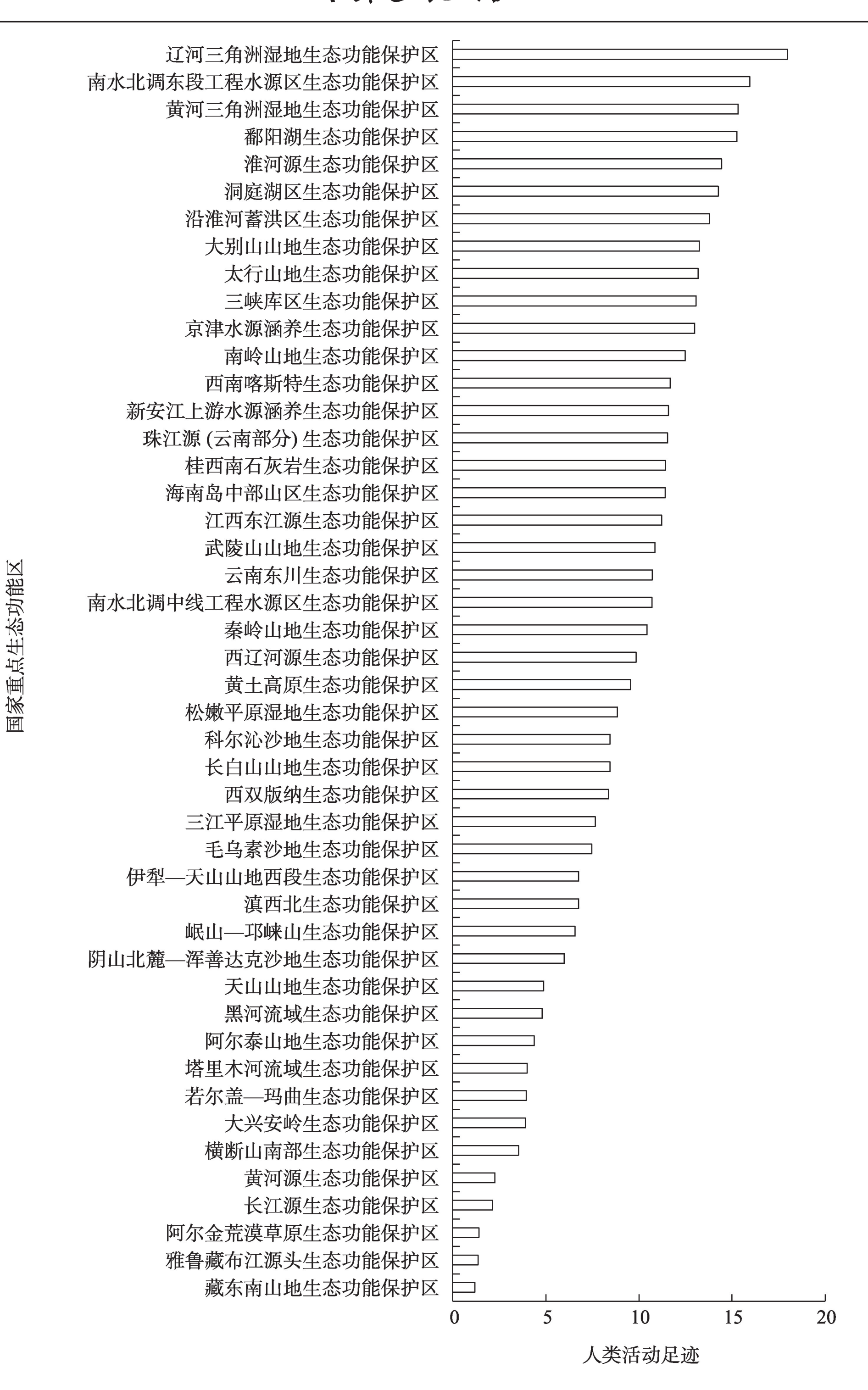


图5 25 a间生态区人类活动足迹平均水平

Fig. 5 Average human footprint of national key ecological function zones in 25 years

度下，Moran's *I*指数均为正，人类活动与生境质量总体上呈正相关。但不同自然-社会背景下的生态区人类活动与生境质量相关性仍有差异，Moran's *I*散点图4个象限均有分布，具体聚类分布如图6所示。

高-高集聚区主要分布在长白山、太行山、秦岭—武陵山、岷山—邛崃山、大别山、新安江、滇西北地区、广西中部喀斯特地区、南岭、西双版纳原始森林区、桂西南地区以及海南岛中部山区。以上区域自然资源禀赋高，有大量的森林、河流、湿地等自然景观，生境适宜度高；优美的生态环境在吸引大量游客的同时，也催生了丰富的人文景观。长期的高-高聚集体现了旅游区内人与自然和谐共生的可

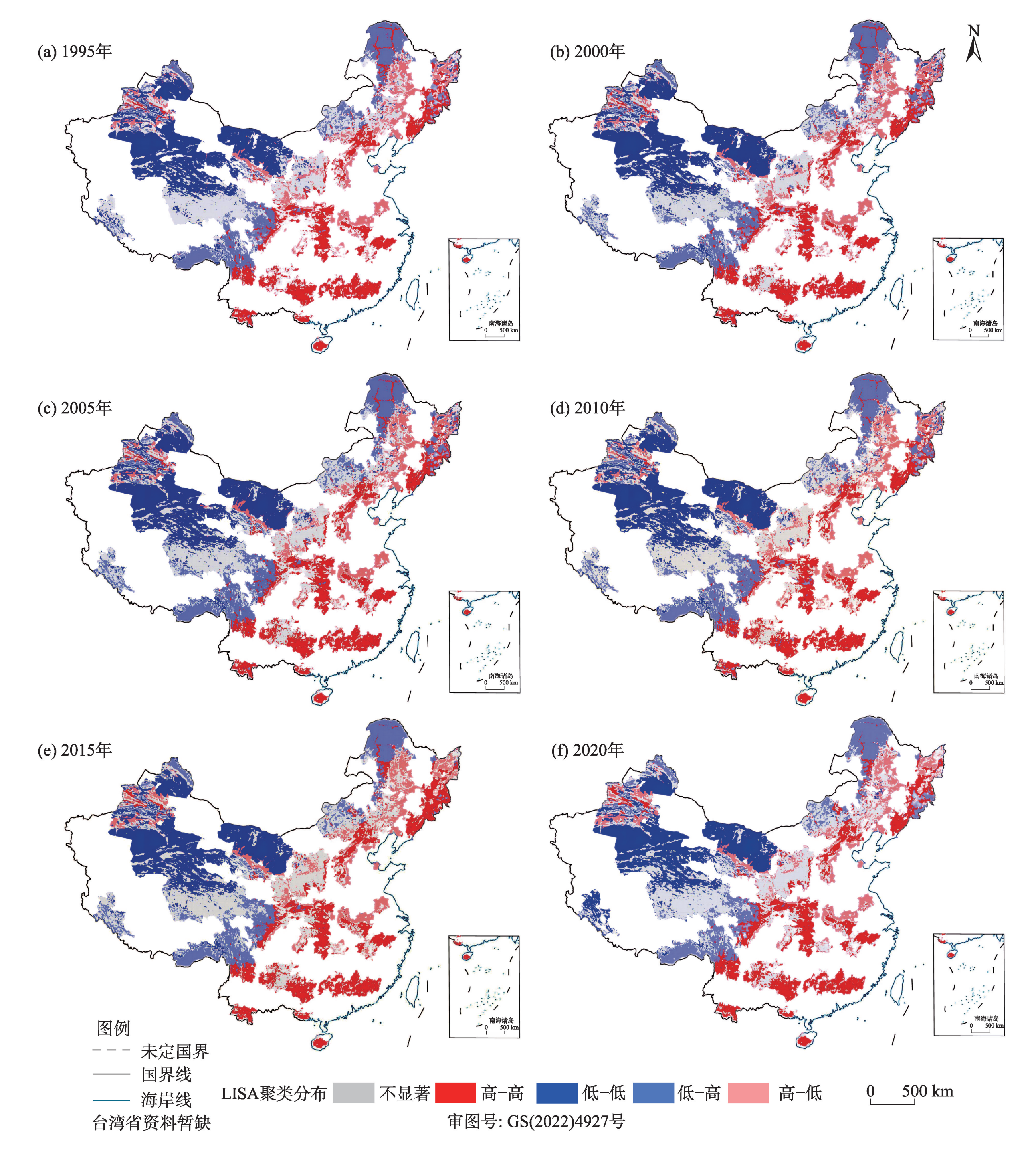


图6 1995—2020年生态区人类活动与生境质量LISA聚类分布

Fig. 6 LISA clustering distributions of human activities and habitat quality in national key ecological function zones during 1995—2020

持续性，是"两山"理论的生动实践。

低-低集聚区主要分布在黑河流域、阿尔泰山、伊犁—天山、阿尔金荒漠草原、塔里木河流域，以上地区由于生态环境脆弱加之人类过度放牧、开垦、樵采等透支行为，导致当地生态退化严重；恶劣的生态环境也迫使人类迁徙到更适宜居住的地方。值得注意的是低-低集聚区并不涉及生态保护区，仅为生态县的部分区域，这表明生态保护区外亦应施行生态保护措施，谨防生态退化向内加重、向外扩散。

低-高集聚区主要分布在雅鲁藏布江源头、藏东南、横断山脉、黄河源以及大兴安岭山区。以上

表5 1995—2020年各人类活动足迹评级标准差椭圆参数变化

Tab. 5 Variation of standard deviation ellipse parameters of human footprint rating during 1995—2020

评级	质心移动/km	Δ长轴/km	Δ短轴/km	Δ扁率
低	191.56	678.38	-215.60	0.09
较低	353.38	204.37	204.66	-0.06
中	1035.98	-83.39	-176.25	-0.02
较高	864.84	-239.28	-535.24	-0.06
高	185.94	-187.06	-127.72	0.08

表6 1995—2020年人类活动与生境质量双变量局部自相关参数

Tab. 6 Bivariate local autocorrelation parameters of human activities and habitat quality during 1995—2020

自相关参数	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
不显著	227312	222777	222704	222611	222159	226507
高-高	92806	91693	89473	82323	98153	99638
低-低	122744	124028	124550	125714	121201	120966
低-高	83364	86462	88708	96035	80331	76425
高-低	51357	52623	52148	50900	55739	54047
I	0.1573	0.1450	0.1422	0.1104	0.1874	0.2184
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

注:I为莫兰指数;P为显著性水平。

区域由于海拔、坡度、水文等自然环境恶劣,为特定动植物栖息地,人类较少在此定居。因此表现为人类活动低、生境质量高的空间分布特征。

高-低集聚区主要分布在松花江、嫩江、黑龙江、乌苏里江、淮河、京杭大运河以及黄河下游地区。自古以来河流周边往往孕育着大量人类文明,平原地区更是容易形成固定聚落,大量的人口聚集驱使人类向外开发土地以满足生产生活的需要,森林、草地等高生态属性的生境减少,仅有河流及沿岸湿地、滩涂等为水生生物及微生物提供生存资源与环境,因此上述地区人类活动与生境质量呈现此消彼长的态势。

3.4 典型人类活动与生境质量空间效应分解测度

前文莫兰指数表明人类活动与生境质量在生态区内有显著的空间相关性,基于不同的自然与社会环境有着不同程度的正负向关系。为进一步研究典型人类活动对生境质量的影响程度,结合研究精度与数据可获取性,在充分保证相关性的前提下,仍以组成HFI的人口、GDP、交通分布数据作为解释变量,构建空间杜宾模型探究其与生境质量的关系①。依据双变量局部自相关结果将生态区数据分为高-高、高-低、低-高3种类型(无低-低类型),相关效应测度结果如表7所示。

高-高集聚区内人口分布的直接效应、间接效应和总效应系数均为显著的正值,这表明在自然资源禀赋较好的生态旅游区内人口分布对生境质量有正向的促进作用,且具有显著的空间溢出效应;而交通则与人口分布空间效应完全相反,效应系数全为负且通过了显著性检验,表明旅游区内交通道路的建设会对生境造成隔断,影响生物生存环境与能量的交换;GDP分布的间接效应与总效应为显著的正向影响,但直接效应为不显著的负向影响,表明旅游区内GDP的变化可能不会对当前区域造成影响,但邻近区域GDP每增加1个单位,当前地区生境质量会上升0.0830个单位。生态旅游区经济增

表7 不同集聚区人类活动与生境质量空间效应分解测度

Tab. 7 Spatial decomposition of human activities and habitat quality in different agglomeration areas

空间效应	变量	集聚类型		
		高-高	高-低	低-高
直接效应	人口	0.0397***	0.0179	0.0204
		(-4.5293)	(-0.6389)	(0.5534)
	GDP	-0.0013	-0.0529**	0.0252
		(-0.2129)	(-2.4926)	(1.1225)
	交通	-0.0090***	-0.0063***	-0.0032
		(-10.0315)	(-2.8362)	(-0.9650)
空间溢出效应(间接效应)	人口	0.0869**	0.0328	-0.0876
		(-2.1967)	(-0.7832)	(-0.4777)
	GDP	0.0830***	0.1201***	0.3030***
		(-4.1270)	(-4.5662)	(3.1522)
	交通	-0.0196***	-0.0159***	-0.0416
		(-4.0943)	(-3.8240)	(-1.2352)
总效应	人口	0.1267***	0.0507*	-0.0672
		(-3.0174)	(-1.7245)	(-0.3548)
	GDP	0.0817***	0.0672***	0.3281***
		(-3.8566)	(4.5625)	(3.2849)
	交通	-0.0286***	-0.0221***	-0.0448
		(-5.4547)	(-5.5088)	(-1.2445)

注:*、**、***分别代表$P<0.10$、$P<0.05$、$P<0.01$;括号内为t统计值;括号上方为系数值。

① 限于篇幅,文章省略了选择空间杜宾模型的理论分析与拉格朗日乘数检验,感兴趣者可向笔者索要。

长依托的正是当地优美的自然风光，随着"两山"理论的不断实践，越来越多的自然风景区将开展生态文明建设，在保住绿水青山的同时，也留下了金山银山。

高-低集聚区内人口分布直接效应与间接效应虽为正，但P值较大，Elhorst[33]与LeSage等[34]研究表明不能仅依靠空间回归系数P值显著与否判断空间效应，受其他未纳入指标体系的变量与误差项的影响，人类活动对生境质量仍有一定的正向影响。高-低集聚区内以华东、华北洪水调蓄功能区为主，枯水与丰水期人口分布和生境都有一定的变化，有共进退的趋势，因此呈现一定的正向空间效应；GDP直接效应与间接效应绝对值的大小表明当前地区生境质量对邻近地区GDP的变化更为敏感，程度也更深，正负号的差异从侧面反映出华东、华北的GDP增长方式较为粗放，有一定程度以破坏生态环境换取经济利益的现象，如挖山采矿、冶金化工、毁林开荒等；交通道路的空间效应仍是显著的负向影响。

低-高集聚区以高海拔、高植被覆盖度的山地为主，人类活动对生境质量的影响有一定的外部性，由于高山地区环境恶劣，人类通常会定居在环境较好的区域，但脆弱又敏感的生态难以支撑人类不间断的生存需求，人类向外寻求更适宜的生存环境在空间尺度上表现为人类占用并驱赶良好生态的格局，因此文明的发展会使人类远离生态脆弱区。在生态与经济理性的双重驱使下，山区大面积的栽种经济速生树种除增加林区收入外，更重要的是改善了生态环境，保护了物种栖息地，如大兴安岭速生林建设；交通道路对高山林区的空间影响仍是负向，但高山林区硬化路面较少，对林区生境质量影响程度深但广度小。

4　讨　论

总体来看，在自然环境与人文地理的双重影响下，研究区生境质量有明显的空间异质性。其中，生境质量由南向北递减与纬度分异是一致的；由东向西递减则与季风气候下海陆位置差异有关；西北部条带状高值区则受北冰洋与大西洋气流影响，局地小气候下，迎风坡上灌木、高山草甸等承载了良好的生态资源。而在高人为干扰度的东部地区，自然密闭性较好的高山、湖泊区域生境较高，强开敞性的平原地区生境较低，生境质量中高值区在东部呈交错分布的格局。研究区人类活动方面，"胡焕庸线"两侧HFI数值差异明显且分离趋势不断扩大，东侧HFI呈"数值高且集中分布"的态势，人类活动强度与广度均不断加深。25 a间，除西南部雅鲁藏布江源头区与藏东南山地区HFI数值下降外，其余44个生态区HFI均有不同程度的增长，而其中36个生态区生境质量亦有不同程度的下降，科学统筹人类生产生活与生态保护的交互行为显得尤为迫切。研究区人类活动与生境质量总体上呈正相关关系，这与传统的人类行为破坏生态环境[35]观点不同，但这验证了前文出于社会和生态效益的需要，在严格的生态保护政策下，适当的人类活动与生境质量可以形成良性互动的观点[18]。局部为负向影响的高-低集聚生态区内应注重生态退化阈值研究，严防走以破坏环境换取经济利益的逆生态潮流之路；低-高集聚区内应加强生态敏感性监测，保护优先，实施生产生活准入清单制度。各地资源禀赋不同，生态文明建设应"一地一策""一区一策"，但应在同一生态系统或命运共同体下，不可各自为战。流域内应加强上、中、下游协作，探索生态补偿机制；森林生态系统内要建立林长制体系，加快碳源碳汇核算并推进碳交易市场建设；城市群周边生态区域要坚持保护优先、适度开发的原则，加大政策倾斜，为城市建设保留绿色底片。同时应加大宣传，推动生态文明思想深入人心，营造共保、共建、共享的绿色社会氛围。

此外，本文因长时间序列空间数据的缺乏，以均等年份点反映变化趋势，放大了误差项的影响，并且由于研究区过大，空间权重选择以邻接矩阵为主，忽略了地理、行政、经济距离的影响。针对以上问题，未来选择合适的人类活动面板数据，借由时空权重矩阵，对不同生态功能主导的生境进行具体化分析，或许可以更为直观的反映人类活动对生态环境的影响程度，为地区人与自然和谐发展提供更可靠的参考。

5　结　论

（1）25 a间研究区生境质量总量略有下降，生态区降幅低于研究区，生态区建设在保护生境质量

上起了重大作用;生境质量高值区主要分布在西南与东北部,低值区主要分布在西北部,且有交互移动的趋势。

(2) 25 a间人类活动强度与广度均不断增加,2010—2020年增幅远超其他年份,高、低值区以"胡焕庸线"为界。

(3) 5个时间节点研究区人类活动与生境质量Moran's I指数均为正值。各集聚区内生态区数量为:高-高集聚15个、高-低集聚5个、低-高集聚5个。

(4) 不同的自然-社会背景下人类活动对生境质量的影响有不同的方向与效应,具体表现为:高-高集聚区内人口与GDP分布总效应为正,以空间溢出效应为主,人口分布影响程度高;高-低集聚区内人口与GDP分布总效应仍为正向的空间溢出效应,但GDP贡献最高;低-高集聚区人口分布影响效应为负,GDP仍是以高贡献的正向空间溢出效应为主;无论何种集聚区,交通道路都是负向的空间溢出效应。

参考文献(References)

[1] 王黎明, 关庆锋, 冯仁国, 等. 全球变化视角下人地系统研究面临的几个问题探讨[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 391-397. [Wang Liming, Guan Qingfeng, Feng Renguo, et al. Problems of man-land relationship system theory under global change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(4): 391-397.]

[2] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统[J]. 经济地理, 1991, 11(3): 1-6. [Wu Chuanjun. Man-earth areal system: The core of geographical study[J]. Economic Geography, 1991, 11(3): 1-6.]

[3] Turner B L I, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8074-8079.

[4] Lyons K G, Brigham C A, Traut B H, et al. Rare species and ecosystem functioning[J]. Conservation Biology, 2005, 19(4): 1019-1024.

[5] Dorsaf Ki, Ke D, Ying Y, et al. Elevation trend in bacterial functional gene diversity decouples from taxonomic diversity[J]. Catena, 2021(199): 105099, doi: 10.1016/j.catena.2020.105099.

[6] Xu J, Lu X, Liu X. Patterns of species and functional diversity of macrofaunal assemblages and the bioassessment of benthic ecological quality status in the southern Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021(171): 112784, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112784.

[7] Singer D, Seppey C V W, Lentendu G, et al. Protist taxonomic and functional diversity in soil, freshwater and marine ecosystems[J]. Environment International, 2021(146): 106262, doi: 10.1016/j.envint.2020.106262.

[8] Mengist W, Soromessa T, Feyisa G L. Landscape change effects on habitat quality in a forest biosphere reserve: Implications for the conservation of native habitats[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(329): 129778, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129778.

[9] Yohannes H, Soromessa T, Argaw M, et al. Spatio-temporal changes in habitat quality and linkage with landscape characteristics in the Beressa watershed, Blue Nile Basin of Ethiopian highlands[J]. Journal of Environmental Management, 2021(281): 111885, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111885.

[10] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234. [Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1221-1234.]

[11] 赵立君, 杨帆, 王楠, 等. 基于生态足迹模型的贵州省仁怀市可持续发展及其影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(7): 870-876. [Zhao Lijun, Yang Fan, Wang Nan, et al. Research on sustainable development and its influencing factors of Renhuai City based on ecological footprint model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(7): 870-876.]

[12] 刘旻霞, 焦骄, 潘竟虎, 等. 青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5306-5317. [Liu Minxia, Jiao Jiao, Pan Jinghu, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5306-5317.]

[13] 孙丽蓉, 周冬梅, 岑国璋, 等. 基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1384-1395. [Sun Lirong, Zhou Dongmei, Cen Guozhang, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River Basin based on the geographic detector model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1384-1395.]

[14] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, et al. The human footprint and the last of the wild: The human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not[J]. Bioscience, 2002, 52(10): 891-904.

[15] Martinuzzi S, Radeloff V C, Pastur G M, et al. Informing forest conservation planning with detailed human footprint data for Argentina[J]. Global Ecology and Conservation, 2021(31): e01787, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01787.

[16] Ayram C A C, Etter A, Díaz-Timoté J, et al. Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2020(117): 106630, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106630.

[17] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6134-6145. [Zhou Ting, Chen Wanxu, Li Jiangfeng, et al. Spatial relationship between hu-

man activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6134–6145.]

[18] He J, Huang J, Li C. The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: A joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model[J]. Ecological Modelling, 2017(366): 58–67.

[19] Mengist W, Soromessa T. Assessment of forest ecosystem service research trends and methodological approaches at global level: A meta-analysis[J]. Environmental Systems Research, 2019, 8(1): 1–18.

[20] 刘慧明, 高吉喜, 刘晓, 等. 国家重点生态功能区2010—2015年生态系统服务价值变化评估[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1865–1876. [Liu Huiming, Gao Jixi, Liu Xiao, et al. Monitoring and assessment of the ecosystem services value in the national key ecological function zones[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1865–1876.]

[21] 丁斐, 庄贵阳. 国家重点生态功能区设立是否促进了经济发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 19–28. [Ding Fei, Zhuang Guiyang. Has the establishment of national key ecological function areas promoted economic development[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(10): 19–28.]

[22] 郭婷, 王奕淇, 李国平. 基于能值生态足迹的国家重点生态功能区补偿标准研究[J]. 生态经济, 2021, 37(7): 154–160. [Guo Ting, Wang Yiqi, Li Guoping. Research on the compensation standard of national key ecological function areas based on the emergy ecological footprint[J]. Ecological Economy, 2021, 37(7): 154–160.]

[23] 栗忠飞, 刘海江. 2011和2019年生物多样性维护型国家重点生态功能区状态及变化评估[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 5909–5918. [Li Zhongfei, Liu Haijiang. An assessment on the change of national key ecological functional zones of biodiversity maintenance in 2011 and 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 5909–5918.]

[24] Kumari M, Sarma K, Sharma R. Using Moran's *I* and GIS to study the spatial pattern of land surface temperature in relation to land use/cover around a thermal power plant in Singrauli district, Madhya Pradesh, India[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019(15): 100239, doi: 10.1016/j.rsase.2019.100239.

[25] Tepanosyan G, Sahakyan L, Zhang C, et al. The application of local Moran's *I* to identify spatial clusters and hot spots of Pb, Mo and Ti in urban soils of Yerevan[J]. Applied Geochemistry, 2019 (104): 116–123.

[26] 尚俊, 蔡海生, 龙月, 等. 基于InVEST模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1901–1915. [Shang Jun, Cai Haisheng, Long Yue, et al. Temporal-spatial distribution and transition of habitat quality in Poyang Lake region based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1901–1915.]

[27] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于InVEST模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2895–2906. [Huang Muyi, Yue Wenze, Feng Shaoru, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui Province based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2895–2906.]

[28] 奥勇, 蒋嶺峰, 白召弟, 等. 基于格网GIS的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 164–175. [Ao Yong, Jiang Lingfeng, Bai Zhaodi, et al. Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on Grid-GIS[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 164–175.]

[29] 段群滔, 罗立辉. 人类活动强度空间化方法综述与展望——以青藏高原为例[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1582–1593. [Duan Quntao, Luo Lihui. Summary and prospect of spatialization method of human activity intensity: Taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43 (5): 1582–1593.]

[30] Anselin L, Rey S J. Modern spatial econometrics in practice: A guide to GeoDa, GeoDaSpace and PySAL[M]. Chicago: GeoDa Press, 2014: 24–45.

[31] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 979–986. [Xie Yuchu, Gong Jie, Zhang Suxin, et al. Spatiotemporal change of landscape biodiversity based on InVEST model and remote sensing technology in the Bailong River watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 979–986.]

[32] Bai Y, Wong C P, Jiang B, et al. Developing China's ecological redline policy using ecosystem services assessments for land use planning[J]. Nature Communications, 2018(9): 3034, doi: 10.1038/s41467-018-05306-1.

[33] Elhorst J P. Matlab software for spatial panels[J]. International Regional Science Review, 2014, 37(3): 389–405.

[34] LeSage J, Pace R. Introduction to spatial econometrics[M]. Florida: CRC Press, 2009: 12–39.

[35] 徐国劲, 谢永生, 骆汉. 生态问题的经济社会根源与治理对策——以美国"黑风暴"事件为例[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5755–5765. [Xu Guojin, Xie Yongsheng, Luo Han. The economic and social origins of ecological problems and control countermeasures: Taking the American "Dust Bowl" incident as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5755–5765.]

Temporal and spatial changes of human activities and habitat quality in national key ecological function areas and their spatial effects

YUAN Hongwei, CAI Jun, ZHANG Lei

(College of Economics & Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: Ecological civilization is a new concept of human civilization development. Scientific measurements of the correlation between human activities and habitat quality can provide theoretical support for the development of an ecological civilization. As a demonstration area for exploring the harmonious coexistence between humans and nature, national key ecological function zones play an important role in safeguarding the national ecological security pattern and coordinating the relationship between humans and the environment. Based on land use data and population, GDP, and traffic distribution data from 1995 to 2020, we used the InVEST model and the human footprint index method to explore the spatial and temporal distribution characteristics of habitat quality and human activities in national key ecological function zones. We used bivariate local autocorrelation and spatial Durbin model to measure their spatial dependence and effects. The results were as follows: (1) The habitat quality in the study area decreased yearly during the past 25 years, and generally showed a pattern of "decreasing from south to north in the west and staggered distribution in the east". (2) The intensity and breadth of human activities increased during the past 25 years, and the distribution of high and low values was bound by the "Hu Line". (3) There was a significant spatial dependence between human activities and habitat quality. The LISA cluster diagram showed that the number of ecological zones in high-high, high-low, and low-high cluster types was 15, 5, and 5, respectively, and there was no low-low cluster. (4) The spatial effects of typical human activities on habitat quality were different under different nature-social backgrounds, but they all had significant spatial spillover effects. Specifically, the total effect of population and GDP distribution in high-high agglomeration areas is positive, and population distribution is the main contributing factor. The spatial spillover effect of population and GDP in the high-low agglomeration area is still positive, but GDP has the highest contribution. The effect of population distribution in low-high agglomeration areas is negative, and GDP is still dominated by the positive spatial spillover effect of high contribution. No matter what kind of agglomeration area, traffic roads are dominated by a negative spatial spillover effect. The development status of the ecological environment and human activities in the national key ecological function areas is evaluated scientifically, the research methods and ideas are enriched, and the correlation discussion on the basis of mathematical analysis provides a policy basis for the construction of ecological civilizations in the study area.

Key words: national key ecological function zones; human activities; habitat quality; spatial autocorrelation; spatial Dubin model